МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

“НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ, МАТЕРІАЛІВ ТА СПОСОБІВ ЇХ З’ЄДНАННЯ У СУДНОБУДУВАННІ”

БОБРОВ Максим Миколайович

МАКРУХА Тетяна Олександрівна

БУТУРЛЯ Євген Андрійович

УРСОЛОВ Олександр Ігорович

2022

Актуальність теми. У суднобудуванні України після значного періоду стагнації намічається суттєвий прогрес. Зокрема, 4 жовтня 2012 року прийнятий **закон "Про державну підтримку суднобудування"**, відповідно до якого планується поступовий контрольований розвиток даної галузі промисловості України. Найпершими задачами для суднобудування є скорочення витрат на створення кінцевого продукту, зниження собівартості побудови та ремонту судна, його вузлів та механізмів, оновлення застарілої виробничої бази та впровадження нових технологій.

Судноремонт є важливою частиною судноплавства. Роботи по ремонту на суднобудівних заводах складають приблизно 25%. Роботи з переобладнання і ремонту іноді є більш рентабельними, ніж будівництво нових суден. Одним з найбільш пріоритетних шляхів вирішення цих проблем є нанесення на поверхню деталей і конструкцій захисних покриттів. Перспективними є способи, у яких використовується **імпульсний вплив** на процес напилення, зокрема механічний, акустичний, електричний, лазерний, гідравлічний та ін.

З іншого боку експлуатаційні характеристики СММ в цілому, їх ресурс роботи визначаються також фізико-механічними властивостями металів і сплавів, з яких вони виготовляються. Високі фізико-механічні властивості металічних матеріалів в останні роки досягаються наноструктуруванням. Тому актуальним завданням сучасного матеріалознавства є розробка методів отримання об'ємних наномасштабних металевих матеріалів з унікальними фізико-механічними властивостями. Досягається це переважно **подрібненням структури (субструктури)**, що є ефективним напрямком підвищення експлуатаційних властивостей техніки.

Застосування сучасних новітніх матеріалів та покриттів в суднобудуванні спостерігається не лише для СММ та корпусних деталей, а також в конструкції енергетичних установок. Підвищення їх надійності та енергоефективності є невід’ємною частиною програм і завдань суднобудування України відповідно **до Закону України «Про проведення економічного експерименту щодо державної підтримки суднобудівної промисловості»** із змінами, внесеними згідно із **Законом № 1197-VII від 10.04.2014, ВВР, 2014, № 24, ст. 883**, суднобудування визнано пріоритетною галуззю економіки України. Основним конструкційним матеріалом в сучасному газотурбобудуванні є жароміцні нікелеві сплави (ЖНС). Не дивлячись на складні умови роботи суднових газових турбінних двигунів (ГТД) спроектовано турбіни нового покоління та розроблено нові ЖНС СМ93-ВІ і СМ96-ВІ, які дозволяють підвищити робочу температуру газу на 40…60 °С. Спільними особливостями сплавів авіаційних і суднових ГТД є проблема їх зварювання плавленням і широке застосування паяння. Однією з найважливіших частин пропульсивного комплексу судна є судновий валопровід, що передає енергію головного двигуна на гребний гвинт та складається з гребного та проміжних валів, підшипників і муфт. У разі відмови валопроводу у процесі експлуатації, судно втрачає хід та керованість. Якщо таке відбувається в умовах відкритого моря під час шторму, судно без ходу не може тримати курс на хвилі, його розвертає лагом до хвиль, що призведе до перекидання. Таким чином, конструктивне забезпечення **надійності роботи валопроводу** є однією з основних задач забезпечення мореплавства судна.

Науково-технічною проблемою, яка вирішується в роботі, є розробка новітніх технологій, технічних засобів, методів нанесення, створення та з'єднання функціональних захисних покриттів та матеріалів за рахунок: модернізації існуючого обладнання, електроімпульсного впливу та гетерофазний високотемпературний струмінь, що дозволить зменшити розмір напилюваних часток та збільшити їх швидкість при напиленні і, як наслідок, отримати більш дрібну та щільну структуру; використання наступної деформаційно-термічної обробки для отримання покриттів та конструкційних сталевих матеріалів зі стабільною наномасштабною субструктурою; розробки припою та технології з'єднання жароміцних сплавів лопаток суднових газових турбін, що загалом дозволить значно підвищити надійність та довговічній деталей суднового машинобудування, зокрема суднових валопроводів з підвищеною функціональною ефективністю.

Метою наукової роботи є розробка новітніх технологій створення функціональних напилених покриттів, матеріалів та способів їх з'єднання для підвищення надійності та довговічності деталей суднового машинобудування, зокрема суднових валопроводів.

Наукові результати роботи:

1. Удосконалено процес електродугового та плазмового напилення щодо підвищення фізико-механічних властивостей покриттів шляхом електроімпульсної дії на високотемпературний гетерофазний струмінь за рахунок здрібнення та прискорення частинок дисперсної фази.
2. Встановлено закономірності впливу електроімпульсної дії на мікроструктуру (знижується пористість та зменшується висота ламелей) та твердість (підвищується на 20…35%) електродугових і плазмових покриттів, та визначено її оптимальні амплітудно-частотні параметри, що забезпечують максимальний рівень фізико-механічних властивостей отриманих покриттів.
3. Вперше показано, що використання електроімпульсної дії на оптимальних амплітудно-частотних параметрах при електродуговому напиленні забезпечує підвищення: середньої підлітної швидкості частинок на 20%, міцності зчеплення покриття з основою на 30%, твердості на 35%, зносостійкості в 1,7 рази та зменшення пористості з 6% до 3%. Використання електроімпульсної дії на оптимальних амплітудно-частотних параметрах при плазмовому напиленні забезпечує підвищення: середньої підлітної швидкості частинок на 25%, міцності зчеплення покриття на 18%, твердості на 20%, зносостійкості в 1,5 рази та зменшення пористості з 8% до 5%.
4. Вперше науково обґрунтовано та запропоновано новий підхід щодо підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей деформованих металів, сплавів та напилених покриттів за рахунок полігонізаційного наноструктурування.
5. Набули подальший розвиток наукові уявлення про механізми формування термічно стійкої полігонізаційної субструктури у деформованих металах, сплавах та напилених покриттях, в основу чого покладено теоретично і експериментально підтверджену гіпотезу щодо створення дислокаційних сплетінь додатковим деформуванням або виділень нової фази штучним старінням, що стримують процеси збиральної полігонізації.

6. Встановлено нові закономірності впливу температурно-часових параметрів механотермічної обробки, виду та ступеня додаткової деформації, типу кристалічної гратки та енергії дефектів упаковки матеріалу, виду та кількості легуючих елементів, технологічного режиму напилення на фізико-механічні властивості оброблених матеріалів та кількість наноструктурних елементів після полігонізаційного наноструктурування.
7. Набув подальшого розвитку процес полігонізаційного наноструктурування щодо підвищення фізико-механічних властивостей теплозахисних градієнтних плазмових покриттів з ZrO_2 – 7%Y_2O_3. Режим полягає у нагріванні до температури 1300 °С, витримці протягом 15 хв та охолодженні на повітрі і забезпечує підвищення твердості HV_5 на 13% та зниження теплопровідності керамічного шару на 15% у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін.
8. Вперше обґрунтовано двоетапний метод розробки припою, суть якого полягає в тому, що на першому етапі з використанням комп’ютерних програм, розрахована основа припою з включенням найбільш ефективних легуючих елементів, що забезпечують твердорозчинне і дисперсійне зміцнення, та границі легування припою тугоплавкими металами для запобігання утворення ТЩУ фаз, зокрема σ-фази, а на другому етапі експериментально визначається необхідна концентрація депресантів.
9. Вперше установлено, що багатокомпонентні припої з Re і Ta системи
Ni-Cr-Co-Al-Ta-Re-W-Mo-Ti-Nb-B-Hf-Zr-C забезпечують крайові кути змочування сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ до 6°, питому площу розтікання 1,4…1,5 мм^2/мг при температурі паяння і виправлення поверхневих дефектів відливок 1200…1230 °С та удосконалено систему легування припою, яка забезпечує довготривалу міцність сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ при 900 °С на рівні 0,9 від міцності основного металу.
10. Розроблено комплексну модель динаміки системи судно-валопровід при ході судна на нерегулярному хвилюванні, яка дозволяє визначати компоненти НДС при згинанні валопроводу під час хитавиці судна на інтенсивному морському хвилюванні та діючі на нього навантаження. Розроблено новий метод розрахунку хвильових навантажень на валопровід, за допомогою якого виконано чисельне дослідження впливу хвилювання різної інтенсивності на роботу суднового валопроводу та визначено вклад в загальне навантаження на валопровід інерційних сил, гідродинамічних сил на гребний гвинт та загальних і місцевих деформацій корпусу судна.
Отримані науково-технічні результати відзначаються принциповою новизною, захищено 10 патентами України на винаходи та корисні моделі, і свідчать про те, що робота ***відповідає кращим світовим аналогам і перевищує існуючі вітчизняні розробки.***судна.

Достовірність результатів досліджень забезпечена коректною постановкою завдань теоретичного й експериментального досліджень, коректним застосуванням фізично і математично обґрунтованих сучасних розрахунково-експериментальних методів дослідження, прийнятною точністю отриманих експериментальних даних та їх математико-статистичною обробкою, задовільним узгодженням результатів теоретичних і експериментальних досліджень та натурних випробувань.

Впровадження результатів досліджень. Основні результати роботи впроваджені на підприємствах: ТОВ «Зерноторгівельна компанія «Прометей», ООО «АГРО ВОЛЯ», ФГ «Покровські ворота» щодо відновлення посадочних місць під підшипники і вузлів гідравлічного обладнання, а саме нанесення покриттів на робочі поверхні поршнів гідроциліндрів. Впроваджено технології: виготовлення чуттєвих елементів зондів хвильовідних радарних рівномірів в ТОВ «АМІКО ДІДЖИТАЛ»; виготовлення валів зі сталі марки Ст3 в ТОВ «Едвайс Ю Уорлд Україна» / Advice You World GmbH (Ukraine); виготовлення регулюючих пружин мембранних клапанів трубопроводів в ТОВ «САКЕНА». Впроваджено припій для паяння жароміцних нікелевих сплавів для суднових газових турбін нового покоління на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» та на ТОВ НВЦ «ПЛАЗЕР» для відновлення паянням у вакуумі пошкоджених високотемпературних елементів обладнання для отримання відцентровим плазмовим розпиленням сферичних порошків. Метод розрахунку згину валопроводу у статичних умовах та під час руху судна знайшов практичне застосування на підприємстві «Інтелектуальні морські технології» та будуть використані для вдосконалення та розширення функціоналу спеціалізованого програмного забезпечення ShaftDesgner.

Представлені матеріали узагальнюють результати робіт, виконаних авторами відповідно до тематичного плану фундаментальних НДР НУК у рамках держбюджетних та госпрозрахункових тем: № 0112U000352 «Наукові основи формування наноструктурних елементів у пластично деформованих металах та прогнозування фізико-механічних властивостей наноструктурних металокомпозитів»; № 0115U000299 «Наукові основи підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей напилених покриттів із металів і сплавів формуванням наноструктурних елементів термічною обробкою та електроімпульсною дією»; № 0121U100406 «Новітні технології створення функціональних напилених покриттів у суднобудуванні»; № 0109U003801 «Виконання заходів, що забезпечать належне функціонування та збереження наукового об’єкта, що становить національне надбання: “Надвисоковакуумний універсальний технологічний комплекс ВВУ-1 Д»; договір № 2/12/1885 «Плазмове напилення теплостійких, теплозахисних покриттів та дослідження мікроструктури, твердості та термоциклічної стійкості»; договір № 01.2013/01/1914 «Атмосферне плазмове напилення високоміцного, теплостійкого, теплозахисного покриття та технічний аналіз»; № 2083 «Механіка та фізико-хімічні процеси при дифузійному зварювання, паянні, зміцненні жароміцних нікелевих сплавів та різнорідних матеріалів»; договір № 45/2108 «Дослідження взаємодії сплаву на основі Ni_3Al з матеріалами прошарків різних систем легування для TLP-дифузійного зварювання та впливу властивостей матеріалів на напружено-деформований стан (НДС) з’єднань жароміцного сплаву при дифузійному зварювання з активацією поверхонь розплавом з використанням комп’ютерного моделювання». Ряд новітніх технологій розроблено сумісно з науковими центром КНР (Університетом науки і технологій Цзянсу, м. Чженьцзянь).

Науковий та інноваційних рівень розроблених технологій підтверджень резолюціями багатьох авторитетних міжнародний наукових форумів на Україні та за кордоном: м-н н.-т. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2012-2021 рр.), «Зварювання та споріднені процеси і технології» (Миколаїв, Київ 2012-2014, 2017-2019 рр.), «Комплексне забезпечення якості технологічних систем» (Чернігів, 2017 р.), «Університетська наука. Проблеми міжнародної інтеграції» (Сєвєродонецьк, 2017 р.), «Сучасні технології обробки матеріалів» (Миколаїв, 2018 р.), «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Миколаїв, 2015, 2017, 2020 р.), «Быстрозакаленные материалы и покрытия: материалы» (Москва, 2013 р.), «Technical sciences: the analysis of trends and development prospect's» (Прага, 2021 р.), «Інноваційні технології та інженіринг у зварюванні і споріднених процесах – «PolyWeld. 2019»(м. Київ, 2019 р.); «14-й Міжнародний симпозіум інженерів-механіків» (м. Львів, 2019 р.), «Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку» (Переяслав-Хмельницький, 2018 р.), «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (Херсон, 2016 р.), «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6» (Київ, 2016 р.), «Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство» (Херсон, 2017 р.), «4-та Міжнародна літня школа нанотехнологій: від фундаментальних досліджень до інновацій» (Мигове, Чернівецька область, 2017 р.), «Фундаментальні та прикладі проблеми сучасних технологій» (Тернопіль, 2020 р.), «Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях» (Харків, 2018 р.).

У першому розділі обґрунтовано можливість підвищення фізико-механічних властивостей напилених захисних та відновних покриттів електроімпульсною дією та передрекристалізаційною термічною обробкою для потреб суднобудування. Встановлено оптимальні амплітудно-частотні параметри електроімпульсної дії при електродуговому напиленні дроту із Св-08Г2С та плазмовому напиленні порошку ПГ-19М-01, які забезпечують підвищення твердості електродугового та плазмового покриттів на 35% та 24% відповідно. Показано, що застосування електроімпульсної дії на оптимальних параметрах призводить до зменшення середнього розміру частинок , підвищення їх середньої підлітної швидкості за рахунок інтенсифікації здрібнення частинок та надання їм додаткової кінетичної енергії у зовнішньому електричному полі. Встановлено, що використання електроімпульсної дії на оптимальних параметрах забезпечує: підвищення міцності зчеплення електродугового з дроту Св-08Г2С та плазмового з порошку ПГ-19М-01 покриттів на 30% та 18%, зносостійкості в 1,7 та 1,5 рази, зменшення пористості та коефіцієнту теплопровідності на..

Експериментально підтверджена можливість підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з ZrO_2 – 7%Y_2O_3 передрекристалізаційною термічною обробкою. Визначений оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки теплозахисного градієнтного плазмового покриття з ZrO_2 – 7%Y_2O_3, що забезпечує підвищення твердості на 13% та зниження теплопровідності керамічного шару на 15% у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Схеми електродугового та плазмового напилення з використанням електроімпульсної дії та її вплив на гранулометричний склад напилюваних частинок

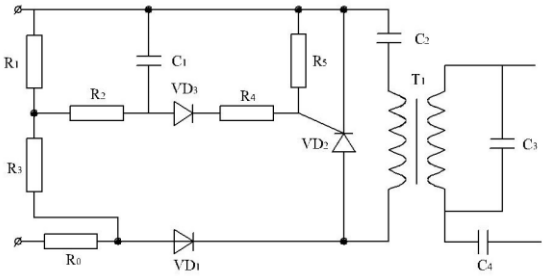
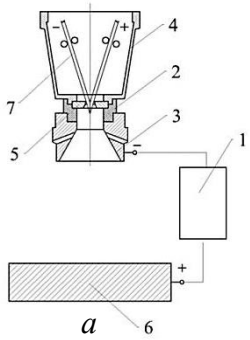
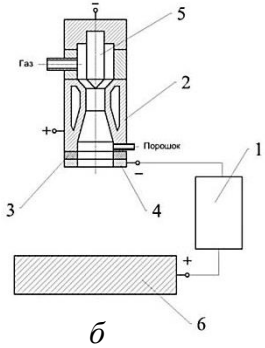
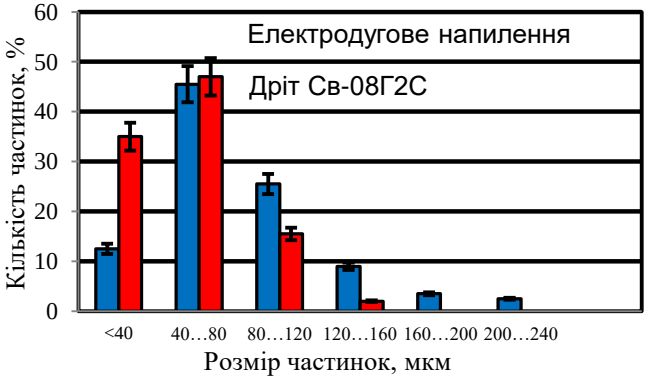


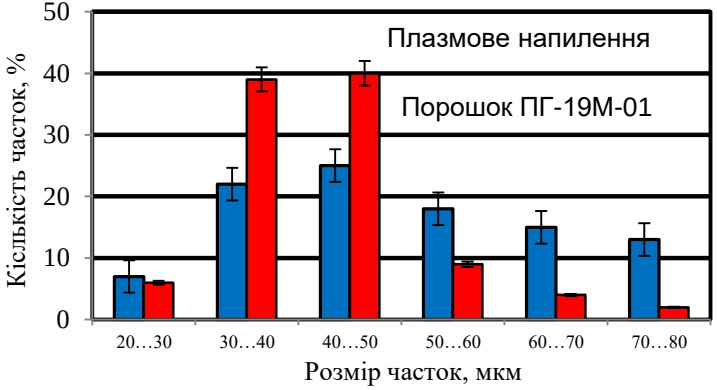
Схема генератора високовольтних електричних імпульсів





Схеми електродугового (*а*) та плазмового (*б*) напилення з електроімпульсною дією на гетерофазний струмінь. *а* : 1 – джерело високовольтних електричних імпульсів; 2 – фторопластовий ізолятор; 3 – захисний екран; 4 – ковпак металізатора; 5 – сопло; 6 – підкладка; 7 – електроди; *б*: 1 – джерело; 2 – анод; 3 – ізолятор; 4 – кільце; 5 – катод; 6 – підкладка.

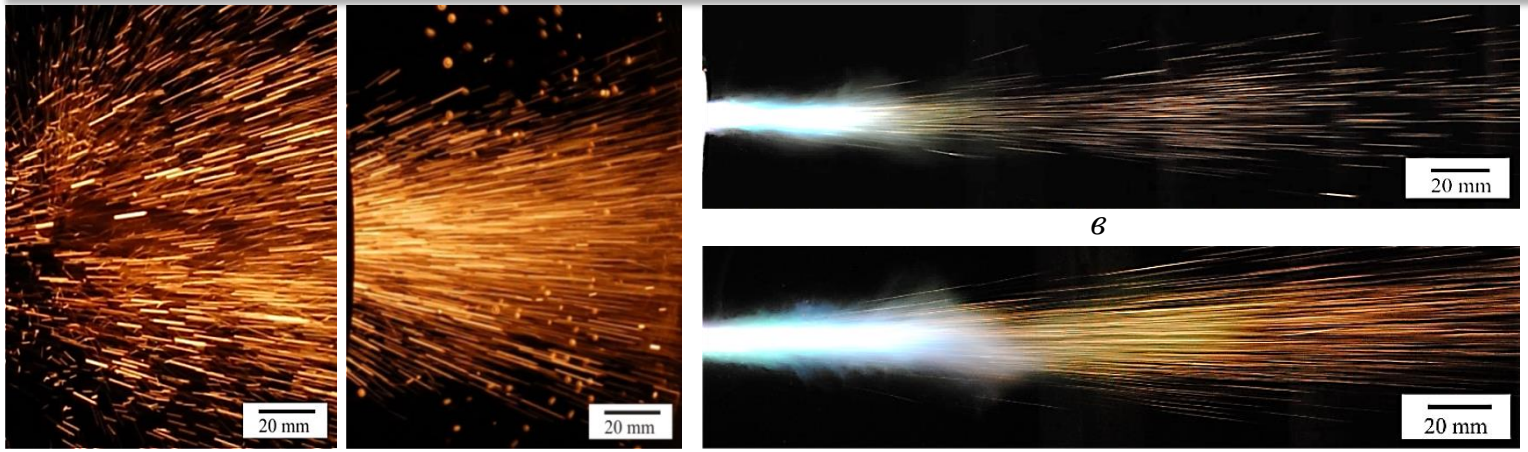




■- напилення проводили за традиційною технологією ;
■ - з використанням електроімпульсної дії (при електродуговому частота імпульсів – 6,5 кГц, при плазмовому – 5 кГц, напруга в обох випадкак – 5кВ)

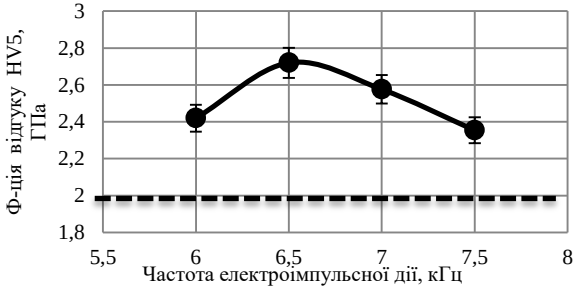
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

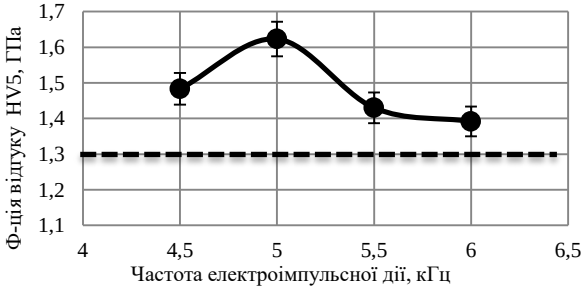
Дослідження впливу електроімпульсної дії на швидкість частинок при напиленні та твердість сформованих покриттів



а *б* *в* *г*

Треки струменя при електродуговому напилюванні дроту Св-08Г2С (експозиція $0{,}25\cdot10^{-3}$с) (*а*,*б*) та плазмовому напиленні порошку ПГ-19М-01 (експозиція $0{,}5\cdot10^{-3}$ с) (*в*,*г*): *а*, *в* – за традиційною технологією; *б*, *г* – з використанням електроімпульсної дії

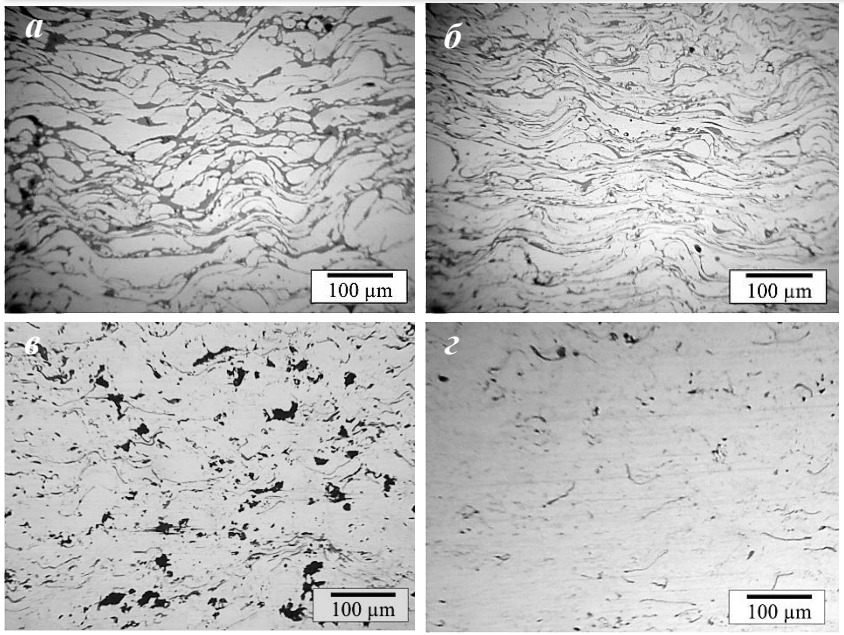




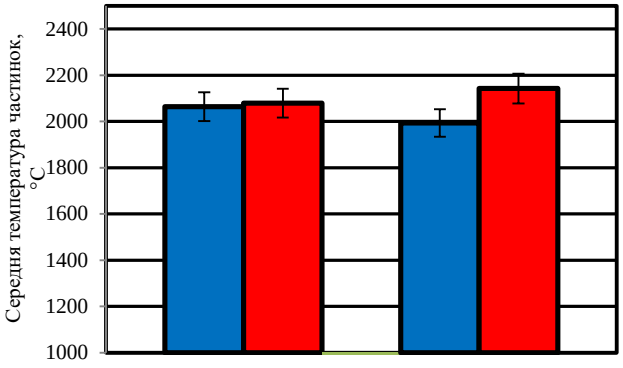
Результати оптимізації амплітудно-частотних параметрів електроімпульсної дії при електродуговому (а) та плазмовому напиленні (б): ---- твердість покриття, напиленого за традиційною технологією

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

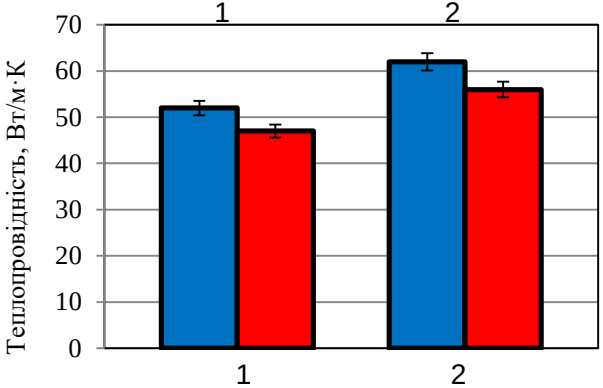
Визначення закономірностей впливу електроімпульсної дії на мікроструктуру, теплопровідність покриттів та температуру напилюваних частинок



Покриття, напилені за традиційною технологією (*а* – електродугове із дроту Св-08Г2С, *в* – плазмове з порошку ПГ-19М-01) та з використанням електроімпульсної дії на оптимальних амплітудно-частотних параметрах (*б* – електродугове, *г* – плазмове)



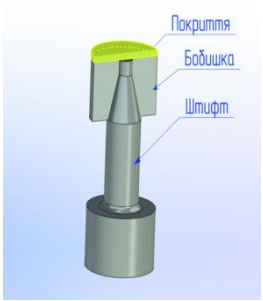
Результати визначення температури частинок при електродуговому (1) та плазмовому (2) напиленні

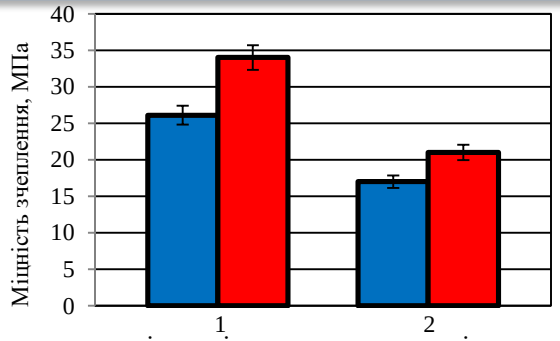


Результати визначення теплопровідності покриттів:
1 – електродугових з Св-08Г2С;
2 – плазмових з ПГ-19М-01
■ - традиційна технологія
■ - з використанням електроімпульсної дії

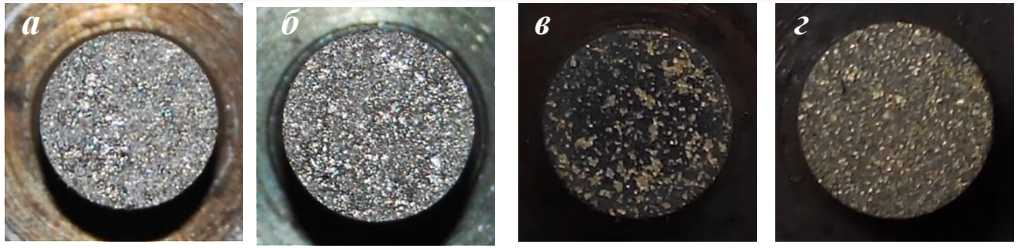
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Визначення закономірностей впливу електроімпульсної дії на експлуатаційні властивості напилених покриттів

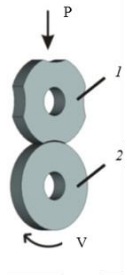


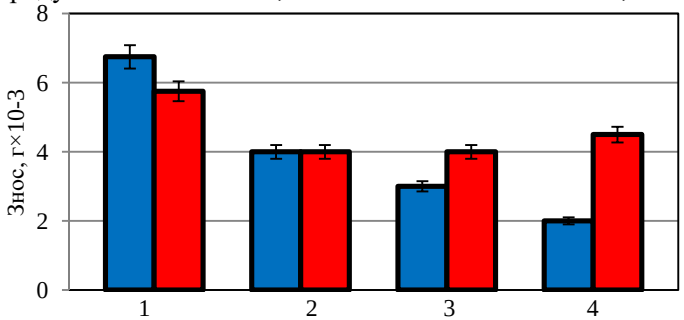


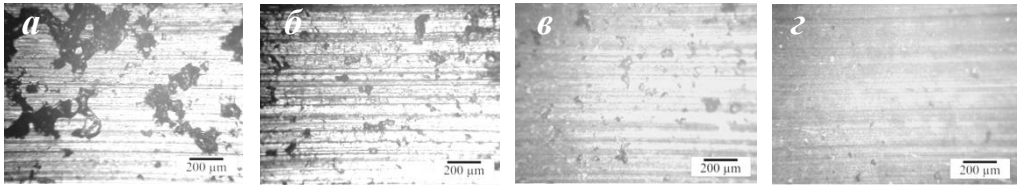
Результати визначення міцності зчеплення покриттів :
1 – електродугових з Св-08Г2С; *2* – плазмових з ПГ-19М-01;



Зразки після випробувань на міцність зчеплення електродугових (*а*, *б*) та плазмових покриттів (*в*, *г*): *а*, *в* – за традиційною технологією; *б*, *г* – з використанням електроімпульсної дії







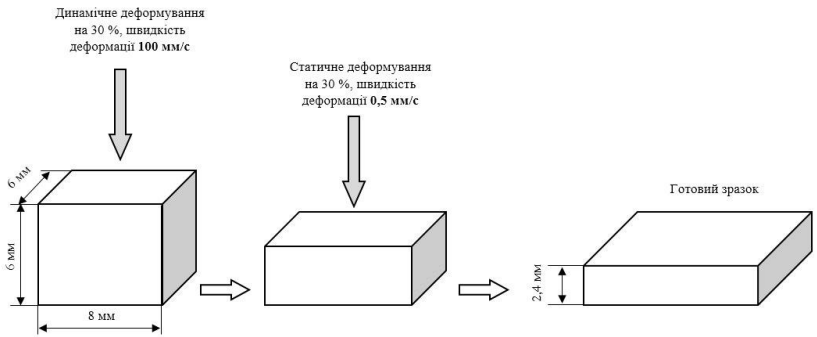
Поверхні тертя електродугових (*а*, *б*) та плазмових покриттів (*в*, *г*): *а*, *в* – за традиційною технологією; *б*, *г* – з використанням електроімпульсної дії

Результати визначення зносостійкості електродугових із дроту Св-08Г2С (1, 2) та плазмових з порошку ПГ-19М-01 (3, 4) покриттів:
1, 3 – за традиційною технологією; 2, 4 – з використанням електроімпульсної дії

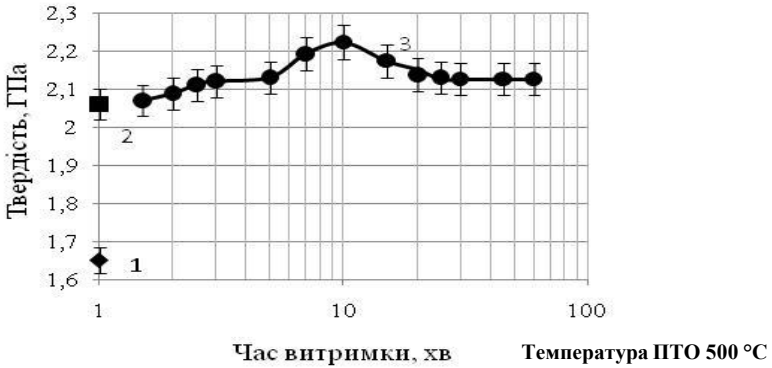
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

У другому розділі роботи досліджено можливість підвищення властивостей конструкційних деформованих сталей за рахунок наноструктурування. Проведені експериментальні дослідження щодо процесу подрібнення субструктури деформованих технічно чистого заліза та сталей передрекристалізаційною термічною обробкою при температурі початку первинної рекристалізації та встановлена можливість підвищення термічної стабільності полігонізаційної субструктури до 60 хв. Встановлено, що стабілізація полігонізаційної субструктури забезпечується комбінуванням одновісних деформацій на стискування, а саме динамічної на 30% та статичної на 30%, з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою при температурі початку первинної рекристалізації, а це забезпечує підвищення міцнісних характеристик на 10…30 % при достатній пластичності. Досліджено вплив деформаційно-термічних факторів на розміри областей когерентного розсіювання рентгенівських променів, які ототожнюють з розміром субзерна, та встановлено, що передрекристалізаційна термічна обробка дозволяє отримати розмір ОКР від 80 до 179 нм. Встановлено, що комбінована деформація та наступна передрекристалізаційна термічна обробка сталей забезпечує збільшення розрахункової кількості наномасштабних субзерен від 15 до 65 %.

СХЕМА КОМБІНОВАНОГО ДЕФОРМУВАННЯ



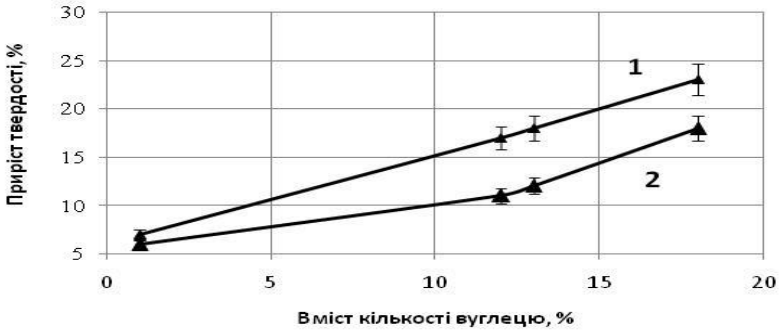
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ КОМБІНОВАНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ПТО НА ТВЕРДІСТЬ ЗАЛІЗА

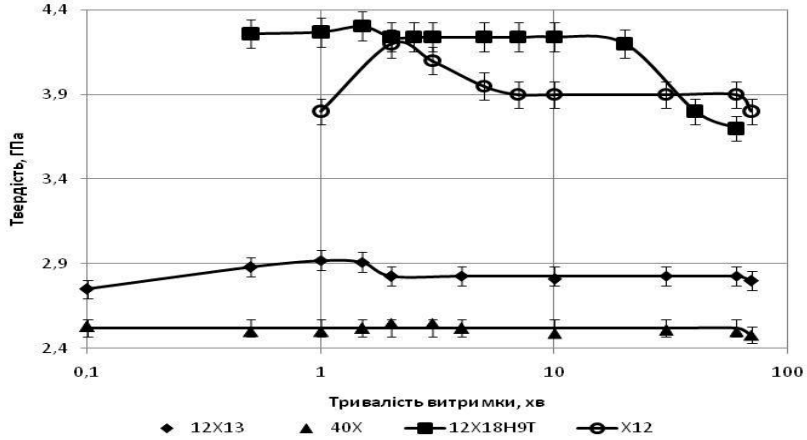


1 – твердість після першого стадії деформування;
2 – твердість після другої стадії деформування;
3 – твердість після комбінованого деформування та наступної термообробки.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМБІНОВАНОГО ДЕФОРМУВАННЯ З НАСТУПНОЮ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЮ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ НА ТВЕРДІСТЬ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Твердість після комбінованої деформації сумарно на 60%:
сталь 40Х – 2,38 ГПа,
сталь Х12 – 3,6 ГПа,
сталь 12Х13 – 2,47 ГПа,
сталь 12Х18Н9Т – 3,5 ГПа.





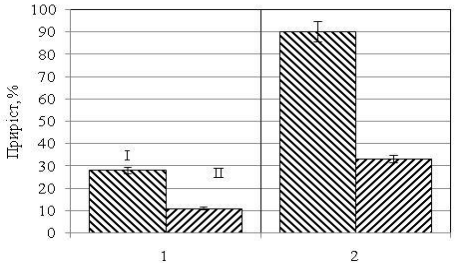
1 – приріст твердості після термічної обробки, яка забезпечує максимальні значення твердості відносно деформованого стану, %;
2 – приріст твердості після термічної обробки протягом 60 хвилин відносно деформованого стану, %;

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМБІНОВАНОГО ДЕФОРМУВАННЯ З НАСТУПНОЮ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЮ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕЙ

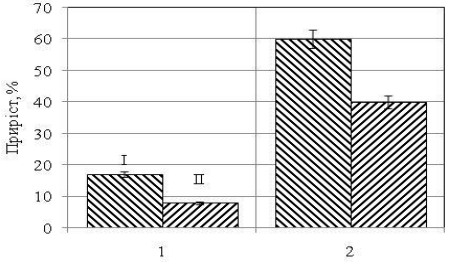
Матеріал	Вид обробки	Твердість HV_5, ГПа	Границя міцності $\sigma_в$, ГПа	Границя пружності σ_y, ГПа	Відносне подовження δ, %	Відносне звуження ψ, %	Модуль Юнга E, ГПа
Ст3	Комбінована деформація	**1,8**	**0,3**	**0,29**	**1,0**	**74**	**198**
	Комбінована деформація, ПТО протягом 2 хв	**2,3**	**0,6**	**0,34**	**5,3**	**75**	**200**
	Комбінована деформація, ПТО протягом 60 хв	**2,0**	**0,4**	**0,28**	**7,5**	**59**	**157**
Х12	Комбінована деформація	**3,6**	**1,0**	**1,01**	**3,3**	**37**	**132**
	Комбінована деформація, ПТО протягом 2 хв	**4,2**	**1,6**	**1,78**	**2,3**	**41**	**244**
	Комбінована деформація, ПТО протягом 60 хв	**3,9**	**1,4**	**1,1**	**2,6**	**33**	**237**

1 – твердість за шкалою HV;
2– тимчасовий опір руйнуванню;
I – показники властивостей комбіновано деформованого зразка з наступною ПТО протягом 2 хвилин;
II – показники властивостей комбіновано деформованого зразка з наступною ПТО протягом 60 хвилин

Приріст показників механічних властивостей сталей Ст3 та Х12



Ст3

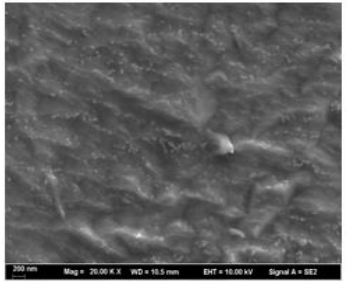


Х12

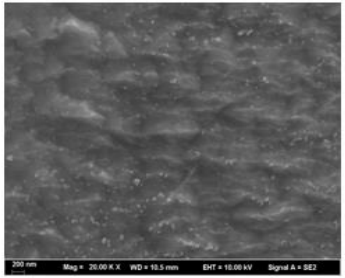
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМБІНОВАНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА РОЗМІР ОКР ТЕХНІЧНО ЧИСТОГО ЗАЛІЗА

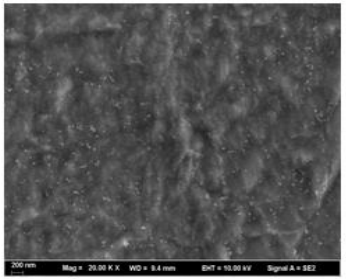
Мікроструктури технічно чистого заліза, ×20000



а



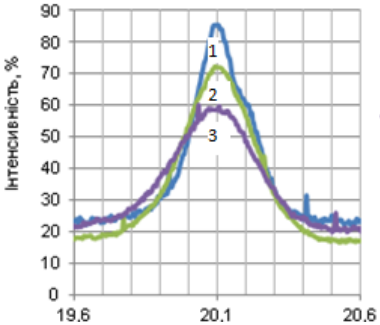
б



в

а – після комбінованого деформування; б – після комбінованого деформування та термічної обробки протягом 10 хв; в – після комбінованого деформування та термічної обробки протягом 60 хв

Дифрактограми технічно чистого заліза



1 – еталон (після відпалу); 2 – після комбінованого деформування сумарно на 60 %; 3 - після комбінованого деформування сумарно на 60 % та наступної передрекристалізаційної термічної обробки, яка забезпечує максимум твердості.

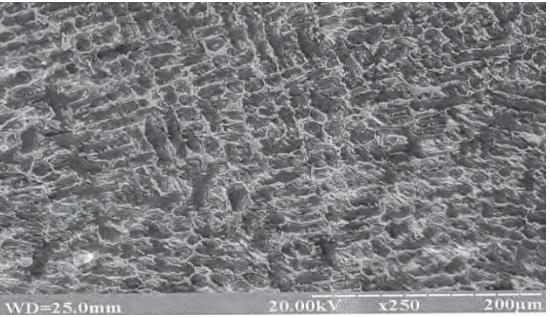
Режим обробки	Твердість, ГПа	Розмір ОКР, нм		
		1	2	3
після комбінованої деформації	1,65	186	172	149
після комбінованої деформації та термооброблки: 500 °С, 10 хв	2,22	125	110	100
після комбінованої деформації та термооброблки: 500 °С, 60 хв	2,116	175	148	140

1 – за формулою Шеррера;
2 – метод кількісної металографії;
3 – метод гармонічного аналізу форми дифракційного профілю

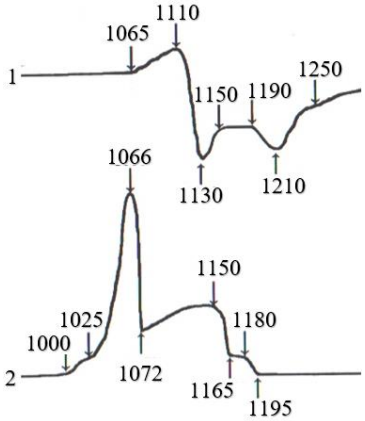
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

У третьому розділі представлено результати розробки пропою та технології з’єднання жароміцних нікелевих сплавів лопаток суднових газових турбін нового покоління. Виходячи з результатів теоретичних і експериментальних досліджень з урахуванням сучасних досягнень матеріалознавства ЖНС обґрунтовано метод розробки припоїв суть якого полягає у використанні комп’ютерних програм на першому етапі для розрахунку граничного легування основи припоїв тугоплавкими металами для запобігання утворенню σ-фази і окрихчуванню спаяних з’єднань, а на другому етапі експериментально визначити концентрації депресантів. За результатами розрахунків з включенням найбільш ефективних легуючих елементів, які забезпечують зміцнення твердого розчину і дисперсійне зміцнення, та експериментальних досліджень впливу депресантів на технологічні характеристики припою, структуру, хімічний склад і механічні властивості спаяних з’єднань розроблено припій SBM-4, що має хімічний склад (% мас.): (12,5-14,5) Cr; (6,5-7,5) Co; (3,0-5,0) Al; (5,0-6,0) Ta; (3,0-4,5) Re; (2,0-3,0) W; (1,0-2,0) Mo; (4,7-6,2) Ti; (0,3-0,5) Nb; (1,0-1,2) B; (0,2-0,3) Hf; (0,45-0,7) Zr; (0,07-0,10) C; решта Ni. Встановлено, що розроблений припій має високі технологічні властивості. При паянні сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ при температурах 1200…1230 °С крайові кути змочування складають до 6°, а питома площа розтікання 1,4…1,5 мм^2/мг. Висока проникність припою в мікротріщини дозволяє його успішно використовувати не лише для паяння, а і для виправлення поверхневих дефектів відливок. Показано, що довготривала міцність спаяних з’єднань сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ при температурі 900 °С на базі 100 годин складає 314 і 321 МПа відповідно, що дорівнює 0,91 і 0,89 від міцності основного металу.

Мікроструктура припою SBM-4



Термограма припою SBM-4:
1 – нагрівання, 2 –охолодження

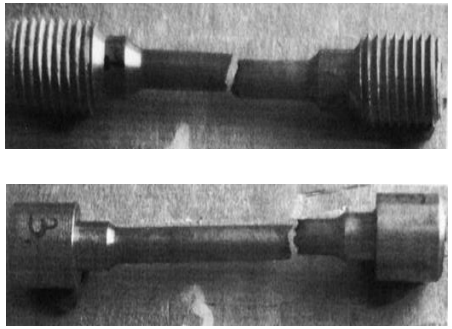


Хімічний склад припою SBM-4

Хімічний склад, % мас.													
Cr	Co	Al	Ta	Re	W	Mo	Ti	Hf	Zr	Nb	C	B	Ni
12,5-14,5	6,5-7,5	3,0-5,0	3,0-6,0	3,0-4,5	2,0-3,0	1,0-2,0	4,7-6,2	0,2-0,3	0,45-0,7	0,3-0,5	0,07	1,0-1,2	решта

Механічні властивості спаяних з’єднань

а *б*



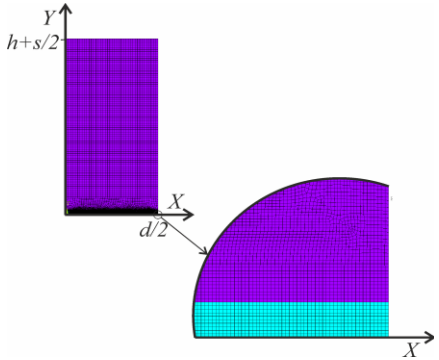
Загальний вигляд зразків після паяння (***а***) і випробувань при температурі 900 °С (***б***) на довготривалу міцність (з різьбою) та визначення границі міцності (без різьби)

№ п.п.	Матеріал	Довготривала міцність σ_{100}^{900}		
		Основний метал $\sigma_{100(о.м.)}^{900}$	Спаяне з’єднання $\sigma_{100(з)}^{900}$	Відношення $\sigma_{100(з)}^{900}/\sigma_{100(о.м.)}^{900}$
1	СМ93-ВІ полікристалічний	314(32)	285(29)	0,91
2	СМ96-ВІ, полікристалічний	321(33)	285(29)	0,89

За допомогою комп’ютерного комплексу ANSYS розроблено модель спаяного з’єднання яка показана на слайді. Аналіз НДС проводили для пружного стану і в умовах миттєвої пластичності.

Визначили вплив:

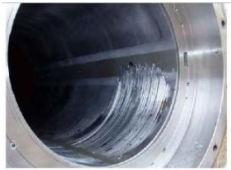
- характеру навантаження;
- товщини прошарку;
- фізико-механічних властивостей основного металу та прошарку.



Переріз вісесиметричної скінчено-елементної моделі (***а***) і зона з’єднання прошарку з основним металом (***б***)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

В четвертому розділі у результаті аналізу причин та статистики аварій у пропульсивних комплексах суден, обумовлених відмовами суднових валопроводів визначено, що найбільш частими відмовами валопроводів є втомне руйнування валів, перегрів, плавлення і випінг дейдвудних підшипників з бабіту та інтенсивне зношення їх неметалевих вкладишів. Основою цих аварій часом є неякісне центрування валопроводу або виборі параметрів центрування без врахування впливу функціонування судна в умовах хвилювання. Удосконалено метод розрахунку компонентів НДС при згинанні суднового валопроводу з урахуванням еласто-гідродинамічного змащення у всіх підшипниках реалізовано за допомогою використання методів скінченних елементів та оптимізації, що дозволило уточнити умови роботи підшипників. Розроблено комплексну модель динаміки системи судно-валопровід при ході судна на нерегулярному хвилюванні, яка дозволяє визначати компоненти НДС при згинанні валопроводу під час хитавиці судна на інтенсивному морському хвилюванні та діючі на нього навантаження. Розроблену комплексну модель динаміки системи судно-валопровід доповнено запропонованим комплексом чисельних алгоритмів розрахунку навантажень, що діють на судно і валопровід. За допомогою розробленого методу виконано чисельне дослідження впливу хвилювання різної інтенсивності на роботу суднового валопроводу та визначено вклад в загальне навантаження на валопровід інерційних сил, гідродинамічних сил на гребний гвинт та загальних і місцевих деформацій корпусу судна.



(а) Надирання бабіту

(б) Втомне руйнування бабіту

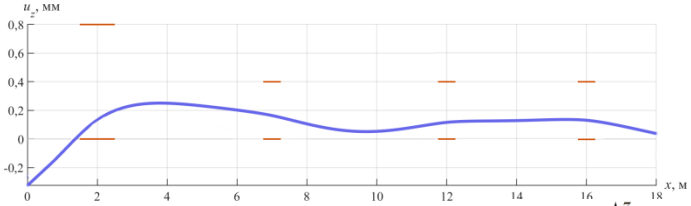
(в) Зношення неметалевих вкладишів

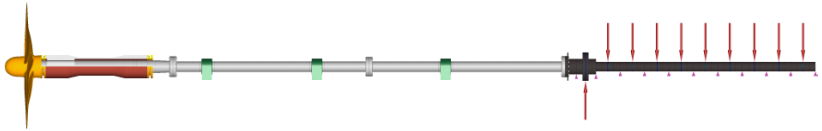
Нелінійні диференційні рівняння динамічного згину валопроводу

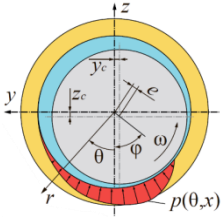
$$\begin{cases} \left[EI_y(x)u_z''(x)\right]'' = q_z(x,u_y,u_z) - \left[\dfrac{EI_y(x)}{GA_z^*(x)}q_z(x,u_y,u_z)\right]'', \\ \left[EI_z(x)u_y''(x)\right]'' = q_y(x,u_y,u_z) - \left[\dfrac{EI_z(x)}{GA_y^*(x)}q_y(x,u_y,u_z)\right]'', \end{cases}$$

Рівняння Рейнольдса для визначення плівки змащення підшипників

$$\frac{4}{d_{sh}^2}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(h^3\frac{\partial p_h}{\partial\theta}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(h^3\frac{\partial p_h}{\partial x}\right) = 6\mu\omega\frac{\partial h}{\partial\theta},$$







Математична модель функціонування системи судно-валопровід та навантаження на підшипники під час руху судна на хвилях

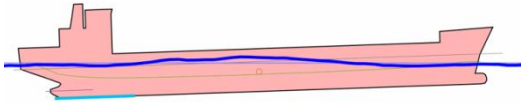
Диференційні рівняння поздовжньої хитавиці судна

$$(M + M_{33}) \cdot \ddot{\zeta} + \Lambda_{33} \cdot \dot{\zeta} + \rho g S \cdot \zeta + (M_{35} - M x_g) \cdot \ddot{\psi} + (\Lambda_{35} + v M_{33}) \cdot \dot{\psi} + (-\rho g S x_f + v \Lambda_{33}) \cdot \psi = (\alpha_3 + i\beta_3) e^{i\sigma t}$$

$$(M_{35} - M x_g) \cdot \ddot{\zeta} + (\Lambda_{35} - v M_{33}) \cdot \dot{\zeta} + (-\rho g S x_f - v \Lambda_{33}) \cdot \zeta + (I_y + M_{55}) \cdot \ddot{\psi} + (\Lambda_{55} + v^2 \sigma^{-2} \Lambda_{33}) \cdot \dot{\psi} + (\rho g J_y - v^2 M_{33}) \cdot \psi = (\alpha_5 + i\beta_5) e^{i\sigma t}$$

Інерційні навантаження від хитавиці

$$q_{in}(x) = -m(x) a_\zeta(x), \qquad F_{in} = -M a_\zeta(x),$$

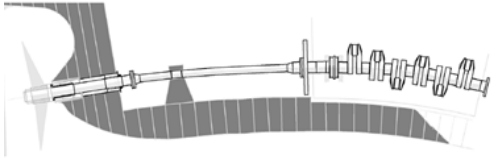


Диференційні рівняння згину і зсуву корпусу судна

$$E I_y(x) \frac{\mathrm{d}^2 u_{gb}(x)}{\mathrm{d}x^2} = N_5(x), \qquad -GA'(x) \frac{\mathrm{d}u_{gs}(x)}{\mathrm{d}x} = N_3(x)$$

Рівняння переміщень днищового перекриття за МСЕ

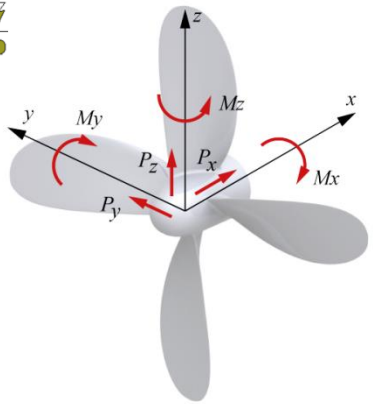
$$[K]\{q\} = \{p\}$$



Поперечні навантаження на гребний гвинт за вихровою теорією

$$P_{y0} = -0.5C \int_{\overline{r}_0}^{1} F_T a'_{(1)} \mathrm{d}\overline{r}; \qquad M_{y0} = -0.25C \int_{\overline{r}_0}^{1} \left[F_T \overline{r} a'_{(1)} - F_M b'_{(1)} \right] \mathrm{d}\overline{r};$$

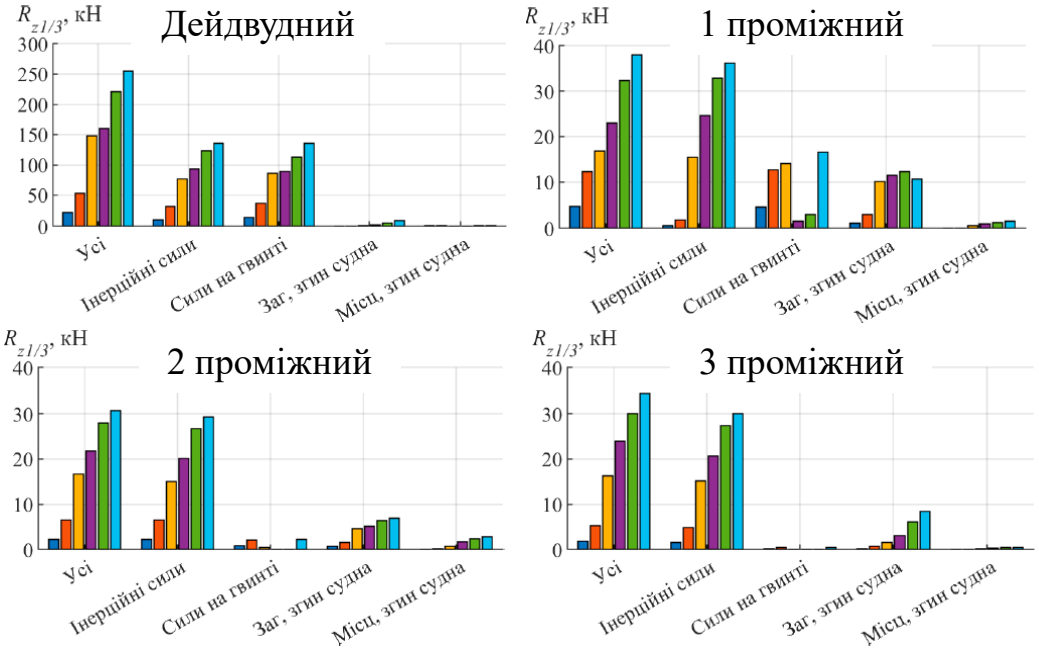
$$P_{z0} = -0.5C \int_{\overline{r}_0}^{1} F_T b'_{(1)} \mathrm{d}\overline{r}; \qquad M_{z0} = -0.25C \int_{\overline{r}_0}^{1} \left[F_T \overline{r} b'_{(1)} + F_M a'_{(1)} \right] \mathrm{d}\overline{r},$$



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Математична модель функціонування системи судно-валопровід та навантаження на підшипники під час руху судна на хвилях

Модель функціонування валопроводу при русі судна на хвилюванні



Вплив різних факторів на навантаження підшипників при хвилюванні

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей електродугових та плазмових покриттів електроімпульсною дією на високотемпературний гетерофазний потік за рахунок здрібнення та прискорення частинок дисперсної фази.
2. Визначені оптимальні амплітудно-частотні параметри електроімпульсної дії при електродуговому напиленні дроту із Св-08Г2С (частота імпульсів 6,5 кГц, амплітуда – 5 кВ) та плазмовому напиленні порошку ПГ-19М-01 (частота імпульсів 5 кГц, амплітуда – 5 кВ), які забезпечують підвищення твердості електродугового та плазмового покриттів на 35 % та 24 % відповідно.
3. Показано, що застосування електроімпульсної дії на оптимальних параметрах призводить до зменшення середнього розміру частинок при електродуговому напиленні дроту Св-08Г2С з 84 мкм до 54 мкм, при плазмовому напиленні порошку ПГ-19М-01 – з 50 мкм до 42 мкм, підвищення їх середньої підлітної швидкості на 20% та 25% відповідно за рахунок інтенсифікації здрібнення частинок та надання їм додаткової кінетичної енергії у зовнішньому електричному полі.
4. Встановлено, що використання електроімпульсної дії на оптимальних параметрах забезпечує: підвищення міцності зчеплення електродугового з дроту Св-08Г2С та плазмового з порошку ПГ-19М-01 покриттів на 30% та 18%, зносостійкості в 1,7 та 1,5 рази, зменшення пористості з 6 % до 3 % та з 8 % до 5 % та коефіцієнту теплопровідності на 12% та 10% відповідно.
5. Визначено оптимальні температурно-часові параметри передрекристалізаційної термічної обробки для електродугових, плазмових та газополуменевих покриттів, що забезпечують максимальний рівень механічних властивостей та мінімальний розмір субзерен. Експериментально підтверджена можливість підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з ZrO_2 – 7%Y_2O_3передрекристалізаційною термічною обробкою. Визначений оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки теплозахисного градієнтного плазмового покриття з ZrO_2 – 7%Y_2O_3 що забезпечує підвищення твердості на 13% та зниження теплопровідності керамічного шару на 15% у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін. Режим полягає у нагріванні до температури 1300 °С, витримці протягом 15 хв та охолодженні на повітрі суднового двигуна. Для забезпечення роботи ЕХМ пропонується використовувати теплоту вихлопних і рециркуляційних екологічних газів перед скрубером системи EGR.
6. Досліджено процес подрібнення субструктури деформованих технічно чистого заліза та сталей передрекристалізаційною термічною обробкою при температурі початку первинної рекристалізації та встановлена можливість підвищення термічної стабільності полігонізаційноїсубструктури до 60 хв. Встановлено, що стабілізація полігонізаційноїсубструктури забезпечується комбінуванням одновісних деформацій на стискування, а саме динамічної на
30 % та статичної на 30 %, з наступною передрекристалізаційною термічною обробкою при температурі початку первинної рекристалізації, а це забезпечує підвищення міцнісних характеристик на 10…30 % при достатній пластичності.
7. Досліджено вплив деформаційно-термічних факторів на розміри областей когерентного розсіювання рентгенівських променів, які ототожнюють з розміром субзерна, та встановлено, що передрекристалізаційна термічна обробка дозволяє отримати розмір ОКР від 80 до 179 нм.
8 За результатами теоретичних і експериментальних досліджень з урахуванням сучасних досягнень матеріалознавства обґрунтовано метод розробки припоїв суть якого полягає у використанні комп'ютерних програм на першому етапі для розрахунку граничного легування основи припоїв тугоплавкими металами для запобігання утворенню σ-фази і окрихчуванню спаяних з'єднань, а на другому етапі експериментально визначити концентрації депресантів.
9. За результатами розрахунків з включенням найбільш ефективних легуючих елементів, які забезпечують зміцнення твердого розчину і дисперсійне зміцнення, та експериментальних досліджень впливу депресантів на технологічні характеристики припою, структуру, хімічний склад і механічні властивості спаяних з'єднань розроблено припій SBM-4, що має хімічний склад (% мас.): (12,5-14,5)Cr; (6,5-7,5)Co; (3,0-5,0)Al; (5,0-6,0)Ta; (3,0-4,5)Re; (2,0-3,0)W; (1,0-2,0)Mo; (4,7-6,2)Ti; (0,3-0,5)Nb; (1,0-1,2)B; (0,2-0,3)Hf; (0,45-0,7)Zr; (0,07-0,10)C; решта Ni (Патент "Припій для паяння жароміцних нікелевих сплавів морських газових турбін" UA 145690).
10. Встановлено, що припій SBM-4 характеризується високими технологічними властивості. При паянні сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ при температурах 1200-1230 °С крайові кути змочування складають до 6°, а питома площа розтікання 1,4-1,5 мм^2/мг. Висока проникність припою в мікротріщини дозволяє його успішно використовувати не лише для паяння, а і для виправлення поверхневих дефектів відливок. Довготривала міцність спаяних з'єднань сплавів СМ93-ВІ і СМ96-ВІ при температурі 900 °С на базі 100 годин складає 314 і 321 МПа відповідно, що дорівнює 0,91 і 0,89 від міцності основного металу.
11.У результаті аналізу причин та статистики аварій у пропульсивних комплексах суден, обумовлених відмовами суднових валопроводів визначено, що найбільш частими відмовами валопроводів є втомне руйнування валів, перегрів, плавлення і випінг дейдвудних підшипників з бабіту та інтенсивне зношення їх неметалевих вкладишів. Основою цих аварій часом є неякісне центрування валопроводу або виборі параметрів центрування без врахування впливу функціонування судна в умовах хвилювання.
12. За допомогою розробленого методу виконано чисельне дослідження впливу хвилювання різної інтенсивності на роботу суднового валопроводу та визначено вклад в загальне навантаження на валопровід інерційних сил, гідродинамічних сил на гребний гвинт та загальних і місцевих деформацій корпусу судна.